

maximum power tracking techniques and control of dc-dc converters for photovoltaic power system // Proceedings of 29th annual IEEE Power Electronics Specialists Conference. – 1998. – Vol. 1. – P. 86–93.
5. Gow J.A. and Manning C.D. *Development of a photovoltaic array model for use in power-electronics simulation studies // IEE Proceedings- Electric Power Applications. – 1999. – Vol. 146, No. 2. – P. 193–199.*
6. Wasynczuk O. *Modeling and dynamic performance of a linecommutated photovoltaic inverter system // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 1989. – Vol. 4, No. 3. – P. 337–343.* 7. Messenger R. and Ventre J. *Photovoltaic Systems Engineering, CRC Press, 2000. – P. 41–51.*

УДК 621.314.222.8

Л.О. Никонець., І.Р. Бучковський, М.Б. Сабат,
Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра ЕПМС

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТРИФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ДІЇ ВІЛЬНИХ СКЛАДОВИХ ВНУТРІШНІХ ПЕРЕНАПРУГ МЕРЕЖІ

О Никонець Л.О., Бучковський І.Р., Сабат М.Б., 2012

Синтез математичних моделей з використанням частотних характеристик, як вхідної інформації об'єкта, – один з пріоритетних напрямів електроенергетичної науки. Це дасть змогу розробити рекомендації для підвищення надійності роботи електрообладнання з обмотками високої напруги.

Ключові слова: трансформатор, математична модель, внутрішні перенапруги, вимірювання, частотна характеристика.

The synthesis of mathematical models with using frequency response as the input data object is one of the priorities for electricity science. It will help to develop recommendations to improve the reliability of the electrical windings of high voltage, whose reliability is insufficient.

Key words: transformer, mathematical model, internal overvoltage, measurement, frequency response.

Постановка проблеми

Будь-яке електрообладнання з обмотками високої напруги (ЕОВН) містить, як мінімум, обмотку, магнітопровід, ізоляцію, які розміщені в корпусі. Зазвичай на етапах проектування електрообладнання та дослідження режимів роботи електромереж не враховують взаємозв'язки між переліченими конструктивними складовими ЕОВН. Наприклад, ізоляцію проектують за заданими рівнями допустимих перенапруг, а проектуючи обмотки, магнітопроводи, їх конструкції та режими, абстрагуються від конструктивних особливостей ізоляції, умовно приймаючи, що значення опору ізоляції прямує до безмежності.

Фізичне явище внутрішнього резонансу [1], що здебільшого спричиняє пошкодження ЕОВН, може бути відтворене за допомогою математичної моделі, якщо вона містить всі елементи конструкції.

Аналіз сучасних досліджень та публікацій

Першу спробу створення моделі ЕОВН, яка містить всі елементи конструкції, зроблено в [2]. Ця модель вперше дозволила дослідити електромагнітні процеси окремо в повздовжній ізоляції та окремо в головній ізоляції трансформатора.

Задача досліджень

Створити математичну модель трансформатора, яка дає змогу дослідити параметри електромагнітних процесів в довільній точці обмотки трансформатора.

Виклад основного матеріалу досліджень

Математичне моделювання сьогодні – основний інструмент дослідження електрофізичних процесів в електроенергетиці [3]. У тих випадках, коли характер електромагнітних процесів відомий, математичне моделювання дозволяє точніше відобразити кількісні характеристики процесу, що досліджується.

Математична постановка технічної задачі – найскладніша та найважливіша частина досліджень. Важливі не стільки методи розрахунку, які обирають дослідники, скільки прийняті спрощення фізичної задачі, яку належить розв'язати. Про це забувають автори різноманітних математичних моделей. Для деяких з них саме математичне моделювання перетворилось з інструменту досліджень в самоціль. Моделей багато, дивись наприклад [3], а розрахувати конкретний процес за дії внутрішніх перенапруг – можливості немає. Для перевірки адекватності потрібно провести експеримент, який для електромагнітних процесів в обмотці трансформатора практично не може бути виконаний.

Характер та кількісні характеристики електромагнітних процесів у трансформаторах мережі до цих пір залишаються невідомими. Сучасна наука не в стані пояснити причини масового пошкодження виткової ізоляції за дії внутрішніх перенапруг [4]. Це, до речі, найстарша в електроенергетиці проблема, яка виникла ще за часів Доливо – Добровольського. До останнього часу основним допущенням в розрахунку електромагнітних процесів в ЕОВН були нехтування електричною провідністю і струмами витоку в ізоляції [5].

Необхідні нові підходи до синтезу математичних моделей, які базувались би на використанні таких положень ТОЕ, які виключали б необхідність експериментальних досліджень електромагнітних процесів в реальному обладнанні для підтвердження адекватності моделі.

Існування явища внутрішнього резонансу обумовлює необхідність кардинальної зміни підходів до вибору ізоляції ЕОВН та методів обґрунтування розрахункових перенапруг на його елементах. Визначальними є не ті перенапруги, що діють на обладнання з боку мережі, а ті перенапруги, які розвиваються на елементах ізоляції ЕОВН, хоча між ними безумовно є детерміністський зв'язок. Таким чином потрібні моделі, які адекватно відтворюють процеси в реальному обладнанні.

Характерною особливістю експлуатації ЕОВН є відсутність інформації відносно конструктивного його виконання. Тому кожний екземпляр обладнання вимушені розглядати як “чорну скриню”, на зовнішню поверхню якої виходять виводи обмоток. З наведеного можна сформулювати перше принципове протиріччя, яке необхідно подолати. Нас цікавлять процеси в середині “чорної скринки”, до якої немає доступу. Зазвичай нам відомі інтегральні характеристики ЕОВН, які наводяться в паспортних даних. Додаткову інформацію мусимо отримати за допомогою спеціальних дослідів з використанням виводів обмоток. Така інформація також має інтегральний характер без прив'язки до конкретної точки об'єму обладнання. Наша мета – отримати, як мінімум, якісне уявлення про процеси в окремих елементах, а, як максимум, – кількісну характеристику процесів. Найпростіше вирішити це питання виведенням на кришку бака додаткового виводу з конкретної точки об'єму, що нас цікавить.

Друге принципове протиріччя полягає в тому, що магнітопровід трансформатора, на відміну від обмоток та ізоляції, – нелінійний елемент. Тому інформація, яку планується отримати за допомогою згаданих вище спеціальних дослідів, буде залежати від значення напруги, за якої проводяться досліді.

Для подолання першого протиріччя пропонується використання підходу “від простого до складного”. Процес синтезу моделі розбивається на етапи :

1. За стандартною методикою створюється трифазна нелінійна математична модель трансформатора для частоти 50 Гц, та визначаються кількісні значення параметрів елементів. Ці параметри на подальших етапах синтезу міняти не можна.

2. На базі моделі для частоти 50 Гц створюється модель трансформатора нульової послідовності для частот вільної складової внутрішніх перенапруг та визначаються кількісні значення параметрів елементів моделі, які також не можна змінювати.

3. На завершальному етапі модель нульової послідовності розвивається в загальну, шляхом визначення параметрів міжфазних опорів.

Реалізація наведеного алгоритму забезпечує фізичну прозорість моделі та можливість за параметрами дії на окремих елементах моделі прогнозувати реальні дії на відповідні елементи оригіналу.

Методом, що дозволяє отримати необхідну інформацію про лінійні параметри об'єкта, математична модель якого синтезується, без проведення практично неможливих експериментальних досліджень реальних електромагнітних процесів у середині об'єкта, є [6] метод експериментального визначення частотних характеристик об'єкта, зокрема відносно точок, що розташовані в тих місцях об'єкта, що цікавлять дослідника.

Для подолання другого протиріччя за допомогою частотних характеристик визначалися лише характеристики лінійних елементів математичної моделі. Параметри нелінійних елементів моделі визначалися прямими вимірами характеристик намагнічування магнітопроводу, зокрема за значеннями напруг та потокощеплень, які мали місце за зняття частотних характеристик.

Адекватність моделі повинна бути обґрунтована шляхом порівняння частотних характеристик оригіналу і моделі.

Для можливості дослідження електромагнітних процесів в довільній точці обмотки ВН А', В', С' структурна схема моделі [2] була розгорнута в структурну схему рис. 1. Розгорнута схема двополюсника Z_i структурної схеми рис. 1 наведена на рис. 2. Параметри двополюсників структурної схеми рис. 1 визначено з використанням методів [7–9]. Результати моделювання параметрів двополюсників структурної схеми рис. 1 для варіанта ділення обмотки ВН на частини 92 і 8 % наведені в табл. 1, а для варіанта ділення обмотки ВН на частини 47 і 53 % – в табл. 2. Для оцінки адекватності моделей двополюсників структурної схеми рис.1 на рис. 3, 4 наведені їх модельні та експериментальні частотні характеристики. Як бачимо з рис. 3 та 4 параметри двополюсників моделі відповідають експериментально визначеним параметрам двополюсників структурної схеми рис. 1.

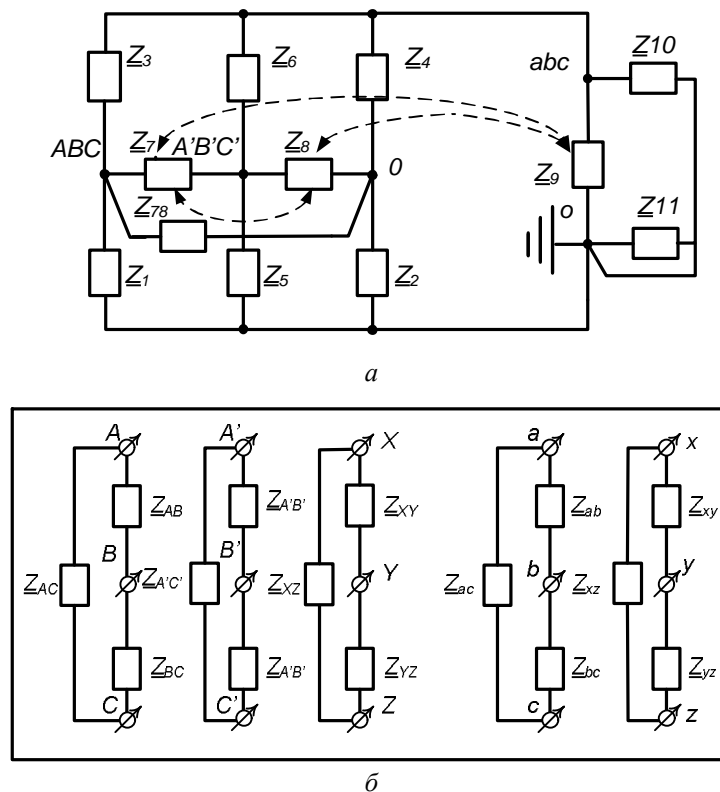


Рис. 1. Структурна схема трансформатора у вигляді комбінації двополюсників:
а – для нульової послідовності; б – для прямої та оберненої послідовностей

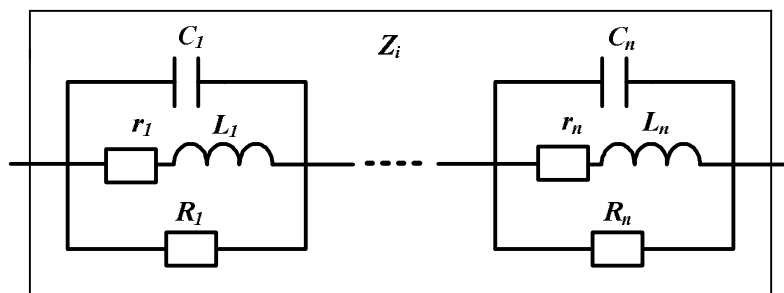


Рис. 2. Розгорнута схема двополюсника Z_i

Моделі з параметрами табл. 1, 2 дають змогу дослідити небезпечні режими в трансформаторі з різними схемами з'єднання.

Таблиця 1

**Параметри елементів структурної схеми
для варіанта ділення обмотки ВН на частини 92 та 8 % довжини обмотки**

Таблиця 1а

Параметри поперечних двополюсників

№		1	2	3	4
$3Z_1$	R, Ом	323725219,2	993132,6	-	-
	C, мкФ	5,65991E-05	0,000168926	-	-
$3Z_2$	R, Ом	4,60728E+11	1,64734E+12	1,226E+11	-
	C, мкФ	0,000225247	9,62924E-05	0,000706432	-
$3Z_3$	R, Ом	1,01312E+12	2,19117E+11	85037764903	50443956859
	C, мкФ	0,000192958	0,000697439	0,001420116	0,002201838
$3Z_4$	R, Ом	23073814236	8790630	-	-
	C, мкФ	6,51265E-05	3,99641E-09	-	-
$3Z_5$	R, Ом	26421469849	76776123473	-	-
	C, мкФ	0,000159394	9,17401E-05	-	-
$3Z_6$	R, Ом	313452000,3	4605426,9	-	-
	C, мкФ	5,91102E-05	1,62706E-05	-	-
$3Z_{10}$	R, Ом	336139684,5	1234273,2	-	-
	C, мкФ	0,000233606	0,002204334	-	-

Таблиця 1б

Параметри повздовжніх двополюсників

№		1	2	3	4	5	6	7
$3Z_7$	C, мкФ	-0,000245	-0,0002379	0,0002316	-0,0004753	-	-	-
	L, мЛГн	-350	-55	150	-10	-	-	-
	г, Ом	70	0	0	0	-	-	-
	R, Ом	4200000	80000	240000	37000	-	-	-
$3Z_8$	C, мкФ	0,02217	0,005983	0,03877	0,07976	0,01414	0,4123	1,5
	L, мЛГн	0,24	1,8	0,6	0,7	6,5	1,5	0
	г, Ом	0	0	0	0	0	0	33
	R, Ом	960	3500	1050	870	6710	200	-
$3Z_9$	C, мкФ	0,305	-	-	-	-	-	-
	L, мЛГн	0,287	0,5707	-	-	-	-	-
	г, Ом	0	0,16	-	-	-	-	-
	R, Ом	150	50000	-	-	-	-	-
$3Z_{78}$	C, мкФ	0,000807	-	-	-	-	-	-
	R, Ом	3000000	-	-	-	-	-	-

Таблиця 1с

Параметри міжфазних двополюсників

№		1	2	3	4
$\underline{Z}_{AB}, \underline{Z}_{BC}$	R, Ом	98431690	5544198,4	2052865,7	-
	C, мкФ	0,000161778	0,000544294	0,000127881	-
$\underline{Z}_{A'B'}, \underline{Z}_{B'C'}$	R, Ом	6,92906E+11	1,26384E+11	60044028002	32277719399
	C, мкФ	0,000255409	0,001000885	0,001913634	0,002630356
$\underline{Z}_{XY}, \underline{Z}_{YZ}$	R, Ом	78422728146	7,01395E+11	1,11946E+11	-
	C, мкФ	0,001227949	0,000265188	0,001096743	-
\underline{Z}_{AC}	R, Ом	2296220457	11289156,2	-	-
	C, мкФ	7,42873E-05	1,45802E-08	-	-
$\underline{Z}_{A'C'}$	R, Ом	48068521060	33499136681	-	-
	C, мкФ	0,000223483	0,000268825	-	-
\underline{Z}_{XZ}	R, Ом	1,10594E+11	23160421037	-	-
	C, мкФ	0,000169251	0,000617511	-	-

Таблиця 2

Параметри елементів структурної схеми
для варіанта ділення обмотки ВН на частини 47 та 53 % довжини обмотки

Таблиця 2а

Параметри поперечних двополюсників

№		1	2	3	4
$3\underline{Z}_1$	R, Ом	2,1E+08	5963800800	2962218	-
	C, мкФ	8,82E-05	0,0001546	0,00002686	-
$3\underline{Z}_2$	R, Ом	6,378E+09	4,539E+10	6,03E+10	6,564E+10
	C, мкФ	0,001677	0,0003415	0,0002793	0,0002136
$3\underline{Z}_3$	R, Ом	1,564E+09	4,846E+08	3086414	-
	C, мкФ	0,000242	0,0007842	0,000003853	-
$3\underline{Z}_4$	R, Ом	5,681E+09	10257900	-	-
	C, мкФ	6,31E-05	6,071E-07	-	-
$3\underline{Z}_5$	R, Ом	2,781E+08	540832	-	-
	C, мкФ	5,69E-05	0,0002542	-	-
$3\underline{Z}_6$	R, Ом	7,127E+09	1,886E+09	3,718E+10	-
	C, мкФ	9,16E-05	0,0002273	0,0009216	-
$3\underline{Z}_{10}=3\underline{Z}_{11}$	R, Ом	1234273	3,36E+09	-	-
	C, мкФ	0,002204	0,0002336	-	-

Таблиця 2б

Параметри повздовжніх двополюсників

№		1	2	3	4	5	6
$3\underline{Z}_7$	C, мкФ	0,0002699	0,00391	0,1251	-	-	-
	L, мГн	260	0,8	0,1	-	-	-
	г, Ом	0	0	0	180	-	-
	R, Ом	1060800	3900	5000	-	-	-
$3\underline{Z}_8$	C, мкФ	-0,002992	0,01251	0,001407	0,003958	0,01608	-
	L, мГн	-30	1	5	1	-7	-
	г, Ом	0	0	0	0	0	85
	R, Ом	20625	1800	5000	4000	5000	-

№		1	2	3	4	5	6
$3Z_9$	$C, \text{мкФ}$	0,59826	-	-	-	-	-
	$L, \text{мГн}$	0,13363	0,5889	-	-	-	-
	$r, \text{Ом}$	0,0225	0,113	-	-	-	-
	$R, \text{Ом}$	80	-	-	-	-	-
$3Z_{78}$	$R, \text{Ом}$	3000000	-	-	-	-	-
	$C, \text{мкФ}$	0,0007	-	-	-	-	-

Таблиця 2с

Параметри міжфазних двополюсників

№		1	2	3	4
Z_{XY}, Z_{YZ}	$R, \text{Ом}$	52559070	3548389	-	-
	$C, \text{мкФ}$	0,000401	0,008991	-	-
Z_{XZ}	$R, \text{Ом}$	4,619E+08	1,161E+08	-	-
	$C, \text{мкФ}$	0,000295	0,0007259	-	-
$Z_{A'B'}, Z_{B'C'}$	$R, \text{Ом}$	73101290	10485870	339623,6	-
	$C, \text{мкФ}$	0,000169	0,001092	0,0005551	-
$Z_{A'C'}$	$R, \text{Ом}$	1.439E+08	18212310	714837,9	-
	$C, \text{мкФ}$	9,55E-05	0,0006944	0,00024422	-
Z_{AB}, Z_{BC}	$R, \text{Ом}$	67997910	25825780	1257701	3497676
	$C, \text{мкФ}$	0,000189	0,0004462	0,00004573	0,00001721
Z_{AC}	$R, \text{Ом}$	2,356E+08	2758117	2885671	-
	$C, \text{мкФ}$	7,07E-05	0,00007755	0,00006295	-

Необхідність визначення параметрів електромагнітних процесів в конкретній точці обмотки ВН зумовила потребу ділення всієї обмотки на відповідні частини. Тобто вийшов еквівалент автотрансформатора. Загальновідомо [5], що в трипроменевій схемі заміщення обмоток таких трансформаторів індуктивний опір розсіяння однієї з обмоток виходить від'ємний. Багато авторів, наприклад [5], стверджують, що ці від'ємні значення опорів не мають фізичного змісту. Тому загальноприйняті рекомендації [10] зводяться до того, що від'ємні значення опору в схемі заміщення приймають такими, що дорівнюють нулю. З цим твердженням погоджуються і автори [2].

Для перевірки обґрунтованості тверджень [2, 5, 10] та формування нових підходів для синтезу математичних моделей спочатку розглянемо приклад. За даними [10] були розраховані для трансформатора типу АТДЦТН-240000/330/220/38,5 ($U_{KBC}=9,6\%$; $U_{KBH}=74\%$; $U_{KCH}=60\%$;) значення напруги к.з. для кожної з обмоток і отримали такі результати: $U_{KB}=11,8\%$; $U_{KC}=-2,2\%$; $U_{KH}=62,2\%$. За цими даними був проведений розрахунок усталеного режиму трифазного к.з. на виводах 330 кВ, під час живлення трансформатора від мережі безмежної потужності 220 кВ, який виявив, що в режимі к.з. на шинах 330 кВ напруга на обмотці 38,5 становила 122,9 % від номінального. Нас всіх вчили, що в режимі к.з. основний магнітний потік трансформатора витісняється за рахунок виникнення в короткозамкнених обмотках розмагнічуючих ампер-витків і, як наслідок, появи магнітного потоку, рівного по величині і протилежного за напрямом основному магнітному потоку. А який же магнітний потік навів в обмотках 38,5 кВ 122,9 % номінальної напруги? Важливо, що ця перенапруга існує протягом всього часу існування режиму к.з. Виходить, що основний магнітний потік не тільки не зник, а збільшився!

Для встановлення фізичної суті цього явища нагадаємо, що автотрансформатор з коефіцієнтом трансформації 330/220 кВ має дві частини обмотки. Спільна частина 0-220 кВ та частина 220-330 кВ. Якщо позначити опір розсіяння частин обмотки відповідно Z_1 та Z_2 , а витки частин обмоток як w_1 та w_2 , то за відсутності основного магнітного потоку струм I_1 в спільній

частині обмотки буде: $I_1=220 \text{ кВ}/Z_1$, а струм I_2 в частині 330–220 кВ – $I_2=220 \text{ кВ}/Z_2$. Якщо співвідношення струмів $I_1/I_2 \neq w_2/w_1$, або $Z_1/Z_2 \neq w_1/w_2$, то виникнуть намагнічуючі ампер-витки, які створюють основний магнітний потік, який може бути більшим за номінальний.

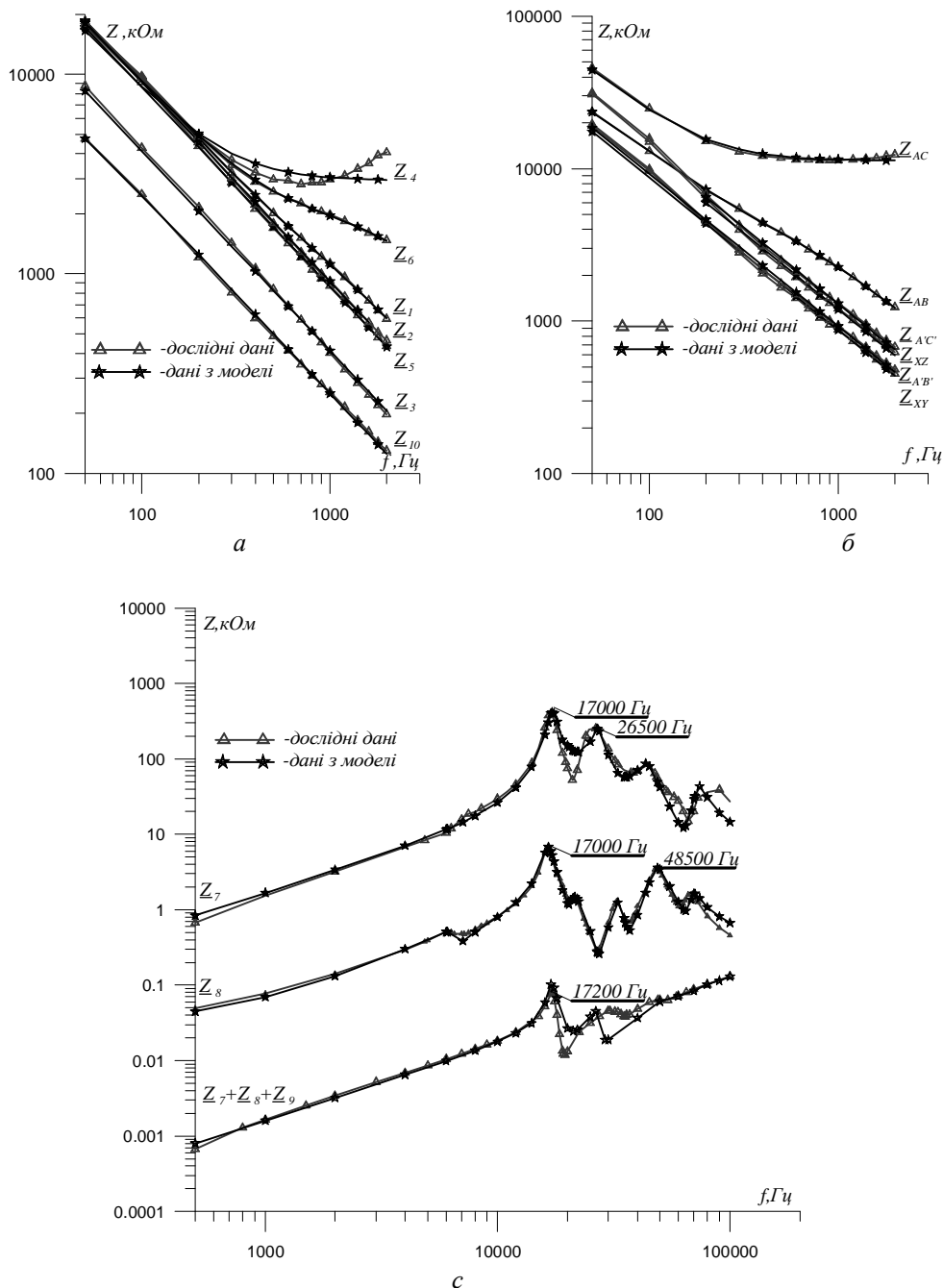


Рис. 3. Частотні характеристики двополюсників моделі для варіанта ділення обмотки ВН на частини 92 та 8 % довжини обмотки: а – поперечних; б – міжфазних; с – повздовжніх

Отже, від’ємне значення одного із опорів трипроменевої схеми заміщення автотрансформатора фізично означає посилення основного магнітного потоку в режимі к.з. Крім того від’ємне значення одного із опорів показує, що значення опорів розсіяння частин обмоток не пропорційні довжині частин обмотки. Враховуючи, що до двох різних частин автотрансформатора в режимі к.з. прикладається одна і та ж напруга, для одночасного балансу згідно з другим законом Кірхгофа повинне виникнути строго фіксоване значення вимушеного потоку, яка залежить від величини прикладеної напруги.

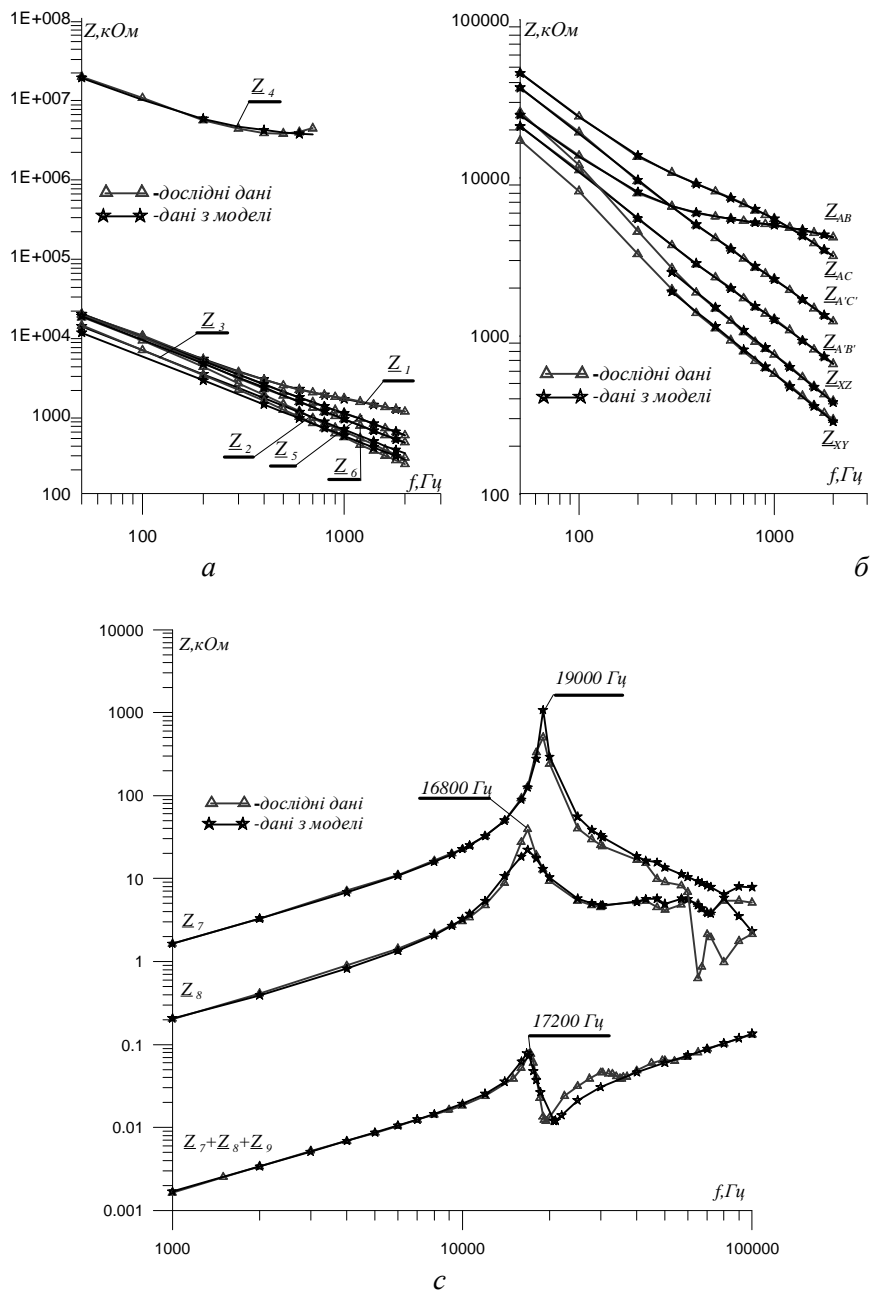


Рис. 4. Частотні характеристики двополюсників моделі для варіанта ділення обмотки ВН на частини 47 та 53 % довжини обмотки: а – поперечних; б – міжфазних; с – повздовжніх

Встановлене явище посилення основного магнітного потоку повинно проявлятися не тільки на основній промисловій частоті, але за дії на обмотку трансформатора чи автотрансформатора перенапруг з високою частотою вільних коливань, що важливо з практичних міркувань, оскільки повинно впливати на надійність роботи виткової ізоляції (емність мережі ВН є практичною закорткою обмоток ВН).

Підтвердженням цього положення є наявність від'ємних значень індуктивності в параметрах, що відтворюють характеристики опорів Z_7 та Z_8 (табл. 1, 2). Частотні характеристики реактивних складових опору розсіяння частин обмотки ВН для різних варіантів ділення обмотки ВН на частини наведені на рис. 5, а, б. Як бачимо з рис. 5, а опір розсіяння частини 92 % має емнісний характер в діапазонах 50-16540 Гц, 25000-45000 Гц. На цих діапазонах опір розсіяння частини 8 % має індуктивний характер. На решті діапазонів характер опору змінюється на протилежний. Причиною

цього є примусовий обмін потужностями між частинами однієї обмотки за допомогою магнітної системи трансформатора.

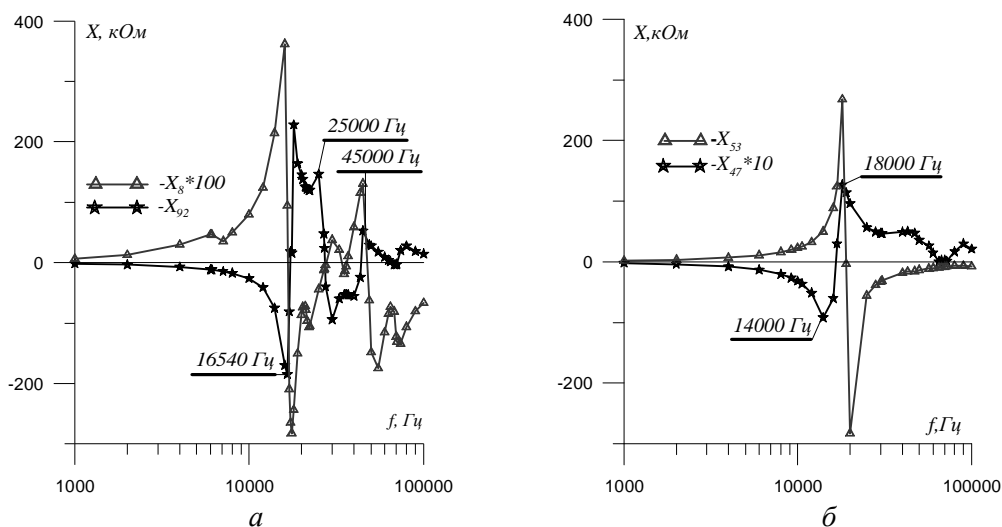


Рис. 5. Частотні характеристики реактивної складової частин обмотки ВН:
 а – для варіанта ділення обмотки ВН на частини 92 та 8 % довжини обмотки;
 б – для варіанта ділення обмотки ВН на частини 47 та 53 % довжини обмотки

Як бачимо з рис. 5, б, опір розсіяння частини 47 % має ємнісний, а опір частини 53 – індуктивний характер в діапазоні 50–14000 Гц. За частоти більше ніж 14000 Гц характер опорів змінюється на протилежний.

Висновки

Синтез математичних моделей з використанням частотних характеристик, як вхідної інформації об'єкта, – один з пріоритетних напрямів електроенергетичної науки. Це дасть змогу розробити рекомендації для підвищення надійності роботи електрообладнання з обмотками високої напруги, надійність якого є недостатньою.

1. Никонець Л.О., Федів Є.І, Молнар М.М. Фізичні явища в електрообладнанні з обмотками високої напруги // *Енергетика та електрифікація*. – 2008. – № 3. – С. 49–52.
2. Конторович Л.Н., Молнар М.М., Никонець О.Л. Математична модель трифазного трансформатора для частот вільної складової внутрішніх перенапруг мережі. // *Новини енергетики* – 2010. – № 3. – С. 40–46.
3. Кириленко О.В., Сегеда М.С., Буткевич О.Ф., Мазур Т.А. Математичне моделювання в електроенергетиці: Підручник. – Львів: Вид-во Нац. ун-ту «Львівська політехніка», 2010. – 261 с., 608 с.
4. Ахметшин Р.С., Рыбаков Л.М. Технические средства диагностирования силовых трансформаторов 10/0,4 кВ на основе частотных характеристик // *Электричество*. – 2005. – № 5.
5. Лейтес Л.В., Пинцов А.М.. Схемы замещения многообмоточных трансформаторов. – М.: Энергия, 1974. – 192 с.
6. Теоретические основы электротехники. Т. 1: Основы теории линейных цепей / Под ред. проф. П.А. Ионкина. – М.: Высш. шк., 1976. – 544 с.
7. Маліновський А.А., Бучковський І.Р., Сабат М.Б., Никонець О.Л., Гуцин Є.Ю., Методи визначення параметрів елементів математичної моделі електроустановки з обмотками високої напруги за дослідними частотними характеристиками // *Новини енергетики*. – 2011. – № 5. – С. 34–39.
8. Маліновський А.А., Сабат М.Б., Бучковський І.Р., Никонець О.Л., Гуцин Є.Ю. Методи моделювання втрат в трансформаторах за дії внутрішніх перенапруг мережі живлення // *Новини енергетики*. – 2011. – № 11. – С. 36–43.
9. Никонець Л.А., Бучковський І.Р., Сабат М.Б. Метод експериментального определения сопротивлений рассеивания частей обмотки высокого напряжения трансформатора // *Новини енергетики*. – 2012. – № 3. – С. 44–48.
10. *Справочник по проектированию электро-энергетических систем* / Под ред. С.С. Рокотяна и И.М. Шапиро, третье издание переработанное и дополненное. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 350 с.